

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL EM FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO MICROLIGADO AO V-Ti.

F. C. Gentile; F. O. Neves; W. Regone; S. T. Button

Cidade Universitária Zeferino Vaz – Unicamp – Campinas – SP
sergio1@fem.unicamp.br

Palavras-Chaves: forjamento; evolução microestrutural; análise numérica.

RESUMO

Os processos de conformação mecânica a quente requerem basicamente as etapas de aquecimento, seguindo-se etapas de deformação nas quais ocorre uma competição entre mecanismos de restauração e endurecimento do material, e logo após, o seu resfriamento. A utilização de aços microligados forjados a quente tem uma extensa aplicação na indústria automobilística, por terem suprimido os tratamentos térmicos posteriores do produto final, devido ao controle dos fenômenos metalúrgicos. Desta forma, para interpretar os fenômenos metalúrgicos através da evolução microestrutural foram realizadas simulações físicas análogas ao processo de forjamento a quente de um aço microligado ao V-Ti em matrizes em cunha. A ferramenta em cunha foi escolhida para promover um gradiente de deformação no corpo de prova. A caracterização microestrutural presente dos corpos de prova mostrou regiões correspondentes a recristalização estática, dinâmica e meta-dinâmica e regiões de endurecimento por encruamento. Tais fenômenos metalúrgicos foram sobrepostos ao mapa de deformação obtidos pelo Método dos Volumes Finitos empregando-se o software SuperForge. Assim, obteve-se uma descrição da evolução microestrutural para o aço microligado que pode ser correlacionada com a deformação obtida no mapa relativo às amostras ensaiadas.

INTRODUÇÃO

Os produtos metálicos semi-acabados, geralmente, são fabricados através de conformação mecânica por meio de processos como o forjamento, a laminação e a trefilação. Para o processo de forjamento a quente, a utilização de aços microligados tem uma extensa aplicação em componentes automotivos. Isto deve-se ao baixo custo de fabricação já que os primeiros aços microligados forjados suprimiram do produto final os tratamentos posteriores. A razão disto é que as propriedades mecânicas são obtidas pelo controle dos fenômenos metalúrgicos como endurecimento por precipitação e controle do da evolução microestrutural. Portanto, as propriedades são alcançadas diretamente no final do processo de forjamento. Um exemplo é o balanceamento da resistência e tenacidade do material através do controle do refino de grãos na microestrutura em processo de forjamento a quente [1].

Durante o processamento a quente de aços, têm-se as seguintes etapas: reaquecimento, que visa a homogeneização da microestrutura; em seguida, as etapas de deformações que transformam um produto de geometria simples num outro de forma complexa, em que as ferramentas denominadas matrizes determinam a geometria do produto. Posteriormente, tem-se o resfriamento onde ocorre a decomposição da austenita. Além das variações dimensionais, durante o processamento ocorrem oscilações microestruturais que dependem das características do material e dos parâmetros operacionais como a deformação, a temperatura, o tempo entre passes e a taxa de deformação [2]. Nas operações de forjamento a quente, a evolução da geometria da peça na zona de deformação é influenciada pelas variáveis de processamento. Por isto, o projeto de peças exige o conhecimento da influência de cada parâmetro no processamento e também a compreensão da interação destas variáveis pela análise da microestrutura.

Quando um material é deformado a quente, como ocorre no forjamento, os fenômenos metalúrgicos que ocorrem devido à deformação controlam a evolução microestrutural dos grãos austeníticos. Assim, o encruamento gera o aumento da densidade de discordâncias dos materiais durante a deformação plástica [3]. A recuperação dinâmica envolve o rearranjo de discordâncias, com

formação de células e subgrãos. Com o encruamento os grãos equiaxiais vão se alongando, gerando sítios propícios para a nucleação e aparecimento dos primeiros grãos nos contornos dos grãos alongados [4]. A recristalização dinâmica inicia-se quando os primeiros núcleos restauram apenas localmente, enquanto o material como um todo continua a encruar. Após o início da recristalização dinâmica provocada pela deformação, os núcleos dinamicamente recristalizados continuam a crescer depois que a deformação é interrompida devido a atuação da recristalização metadinâmica [5]. Após o término da deformação tem-se a recuperação estática que restaura o material até uma certa proporção. O amaciamento ou restauração total só ocorre através da recristalização estática que inicia-se pela nucleação de novos grãos e é necessário um tempo de incubação. Esse fenômeno elimina as discordâncias de forma coletiva, com a nucleação e crescimento de novos grãos isentos de deformação [6].

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento da evolução dos grãos austeníticos através de simulação física por compressão a quente. Assim, com os dados microestruturais, pode-se sobrepor e interpretar os fenômenos metalúrgicos causados pela deformação baseando-se nos mapas de deformação obtidos pelo Método dos Volumes Finitos, empregando-se o software SuperForge.

MATERIAL E MÉTODO

Neste trabalho realizou-se uma simulação física por compressão a quente em um aço microligado, para avaliar sua conformabilidade, e também observações da evolução microestrutural da austenita nos corpos-de-prova deformados.

Paralelamente, foram realizadas simulações numéricas com o objetivo de mapear as deformações em todo o volume do corpo deformado.

Material

No presente projeto utilizou-se um aço comercial médio carbono, adotado em processos de forjamento com resfriamento controlado para fabricação de componentes automobilísticos. A análise química foi realizada na SIFCO S.A. , cuja composição química está indicada na [Tabela 1](#).

Tabela 1 - Composição química do material (% em peso).

C	Mn	Si	Al	S	P	Ti	V	N
0,32	1,51	0,66	0,024	0,031	0,016	0,028	0,099	0,006

Este material estava na condição de barra "bruta de laminação" a quente resfriada ao ar calmo, com dimensão da seção transversal quadrada de 72,0 mm. Posteriormente o material foi relaminado a quente e resfriado ao ar calmo na SIFCO S.A. até a forma de barras redondas de diâmetro 18,0 mm. A relaminação foi realizada com temperatura na faixa de 1150 a 1200 °C. Para preservar as condições reais de processamento de um aço destinado a processos de forjamento, não foi utilizado nenhum tratamento térmico prévio aos corpos de prova a serem ensaiados[7].

Ensaio de conformabilidade

Corpos de prova com 15mm de diâmetro e 20mm de comprimento foram deformados para a avaliação da conformabilidade. Os ensaios de conformabilidade foram realizados a 1150°C em prensa hidráulica com capacidade de carga de 50 toneladas com ferramenta inferior plana e superior em cunha. A ferramenta em cunha foi escolhida para promover um gradiente de deformação no corpo de prova após a deformação. A velocidade de deslocamento da ferramenta superior foi de 15 mm/s, o que impôs uma taxa de deformação de 0,93 s⁻¹. Figura 1a representa um esquema do corpo de prova e ferramentas antes da deformação, e a Figura 1b, o corpo de prova após a deformação.

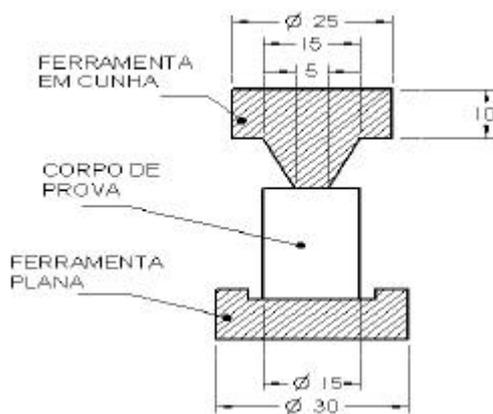


Figura 1a - Corpo de prova e ferramentas antes da deformação. Dimensões em mm.

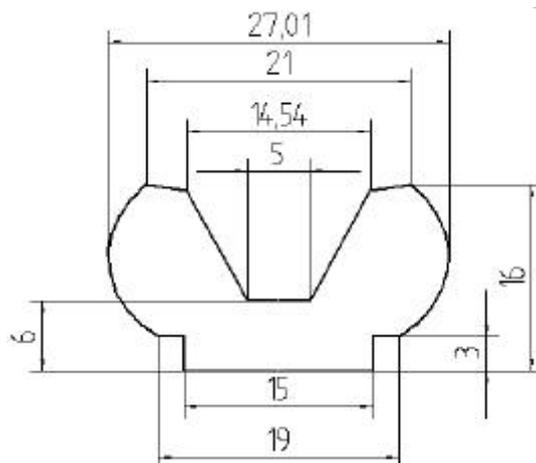


Figura 1b - Corpo de prova após a deformação. Dimensões em mm.

Após a deformação, os corpos de prova foram resfriados de dois modos diferentes: resfriados em água. Para as análises microestruturais o objetivo foi a observação dos grãos austeníticos. Estas análises foram feitas no sentido longitudinal (mesmo sentido da deformação) em toda extensão do corpo de prova. Para revelar as microestruturas das amostras, foi utilizada técnica convencional. As amostras foram embutidas, lixadas, polidas com alumina de granulometria de 1 a 0,5 μm e atacadas com uma solução aquosa saturada de ácido pícrico ($\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$) com detergente da Kodak, "photo-flo 200 solution", atuando como agente molhante (10 gotas para 200 ml de solução). As amostras foram imersas no reativo aquecido (aproximadamente a 80°C) por 60 a 120 segundos, seguindo-se de polimento brando (alumina 0,3 μm) para melhorar a observação dos contornos de grãos austeníticos. O processo de ataque, comentado acima, foi repetido diversas vezes, até que o resultado fosse satisfatório [8].

Simulação Numérica

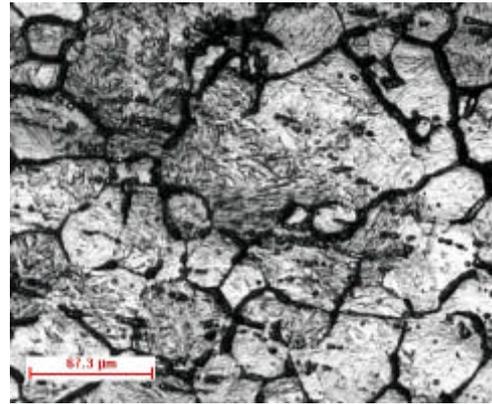
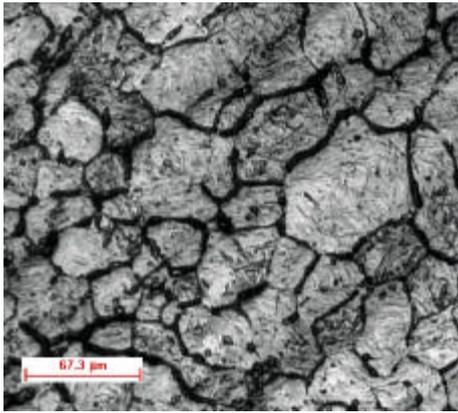
A simulação numérica foi conduzida através do software MSC.SuperForge 2000. Foram utilizados 1160 elementos hexaédricos de 8 nós. Foi adotado para o material do corpo de prova um modelo rígido-perfeitamente plástico com limite de escoamento 50 MPa a 1100 °C à taxa de deformação de 0,93 s^{-1} . Também foram adotados para o material as seguintes propriedades térmicas: condutividade térmica = 46,7 W/(m.K), calor específico = 41,9 J/(kg.K), coeficiente de transferência de calor para o ambiente = 50 kcal/(m².h.°C) e coeficiente de expansão linear=15,1 $\mu\text{m}/(\text{m.K})$. A temperatura das ferramentas foi considerada igual a 27 °C, coeficiente de transferência de calor para o ambiente = 50 kcal/(m².h.°C) e coeficiente de troca de calor peça/ferramentas = 6000 W/(m².°C). A velocidade de avanço da ferramenta foi estipulada em 14 mm/s e foi utilizada um coeficiente de atrito típico para trabalho a quente de 0,3 [9 e 10].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, pretende-se descrever e analisar resultados obtidos com relação ao comportamento a evolução microestrutural em todo volume dos corpos de prova ensaiados por conformabilidade, os fenômenos metalúrgicos atuantes no material através de análise de suas fotomicrografias e mapas da deformação obtidos pelo Método dos Volumes Finitos empregando-se o software Superforge.

Microestrutura no encharque

As Figuras 2a e 2b mostram as fotomicrografias dos grãos austeníticos na temperatura de 1150°C, temperadas após 10 minutos de encharque.



Figuras 2a e 2b - Fotomicrografias mostrando grãos austeníticos na temperatura de 1150°C, temperados após 10 minutos de encharque.

Nesta figura observa-se crescimento anormal de grão, devido ao longo tempo de encharque.

Análise da simulação numérica

O resultado da simulação numérica foi aferido pela geometria do produto deformado na simulação física, encontrando uma aproximação de 98%. Na **Figura 3a**, apresentamos o mapa do gradiente de deformação equivalente, obtido pelo método dos volumes finitos. O mapa mostra uma pequena região altamente deformada (1,6), registrada em vermelho e configurando uma frente de deformação na extremidade da cunha. A frente de deformação perde em intensidade em direção à superfície livre do corpo de prova, atingindo uma região de pequena deformação (0,2). Na **Figura 3b** observam-se as regiões indicadas de (1) a (7) onde foram observados os grãos austeníticos por fotomicrografias.

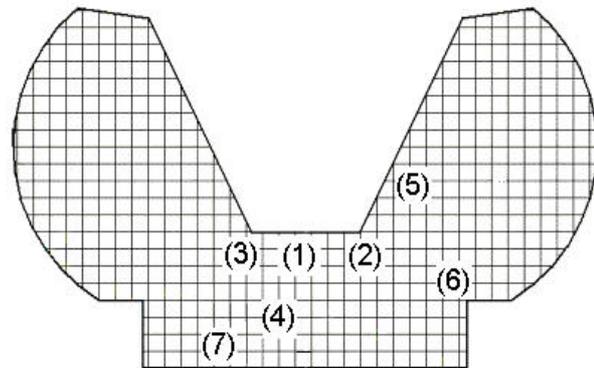
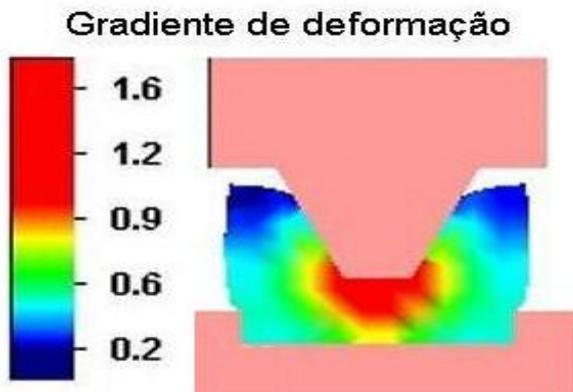


Figura 3a - Variações de cores mostrando o gradiente de deformação para o corpo de prova deformado.

Figura 3b - Esquema do corpo de prova deformado. As regiões de (1) a (7) foram observadas por fotomicrografias.

A **Figura 4** mostra uma região que contém alto nível de deformação. A microestrutura resultante apresenta grãos austeníticos de maneira heterogênea. Na parte superior desta fotomicrografia apresentam-se grãos austeníticos alongados, não definidos, e entre eles, pequenos grãos. Os fenômenos metalúrgicos atuantes nesta região durante a deformação são o encruamento, com algum indício da recristalização dinâmica. Na parte inferior da fotomicrografia observam-se pequenos grãos, caracterizando um alto índice de refinamento do campo austenítico. Portanto, a recristalização dinâmica é o processo dominante de restauração do material. A **Figura 5** mostra uma microestrutura presente nas regiões (2) e (3), pois ambas têm o mesmo nível de deformação. Na fotomicrografia pode-se caracterizar o lado esquerdo em conjunto com a parte superior, onde tem-se grãos deformados com pequenos grãos austeníticos que foram nucleados no seu contorno. Na parte da direita da fotomicrografia em conjunto com a parte inferior há um alto grau de refinamento dos grãos austeníticos pressupondo-se a interação entre recristalização dinâmica mais recristalização metadinâmica.

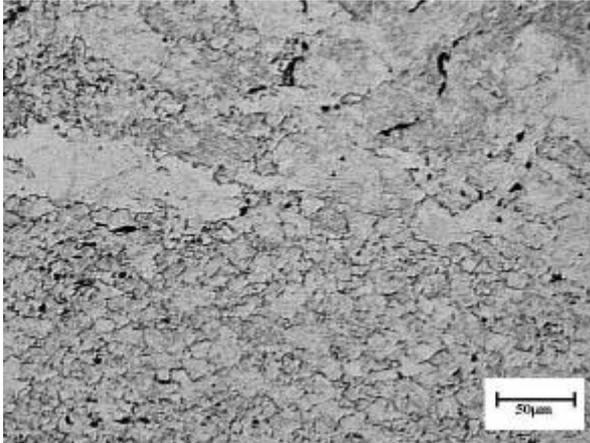


Figura 4 - Fotomicrografia mostrando grãos austeníticos da região (1).

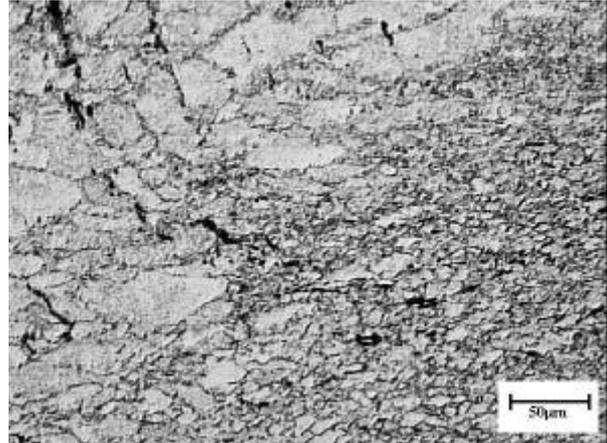


Figura 5 - Fotomicrografia mostrando grãos austeníticos da região (2).

As **Figuras 6 e 7** mostram regiões com alto grau de refinamentos de grãos austeníticos para um nível médio de deformação. Assim, para as regiões (4) e (5) não há uma fronteira de separação entre o encruamento com a recristalização. O que se observa-se é uma contínua atuação da recristalização dinâmica com a metadinâmica devido ao refinamento dos grãos.

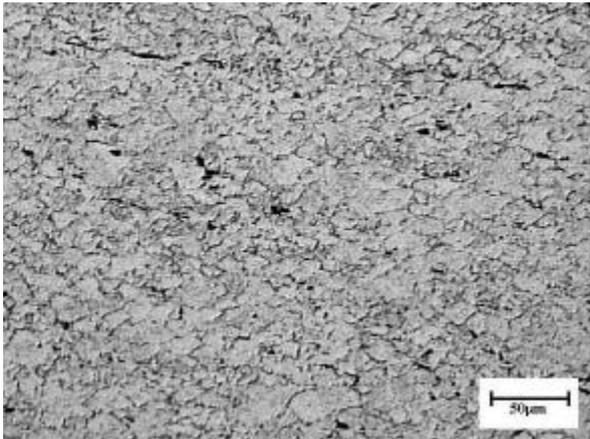


Figura 6 - Fotomicrografia mostrando grãos austeníticos da região (4).

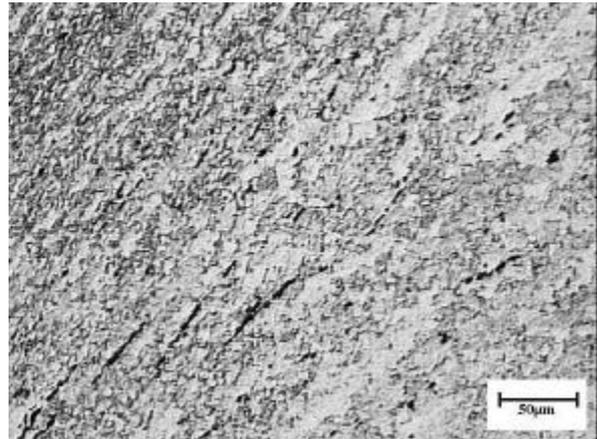


Figura 7 - Fotomicrografia mostrando grãos austeníticos da região (5).

Para a **Figura 8** tem-se um pequeno nível de deformação, assim, o único fenômeno metalúrgico que atua no material é o encruamento, como pode ser observado pela forma alongadas dos grãos austeníticos. Já na **Figura 9** mostra uma região que praticamente não sofreu deformação caracterizando os grãos austeníticos que se encontravam na temperatura de encharque do material.

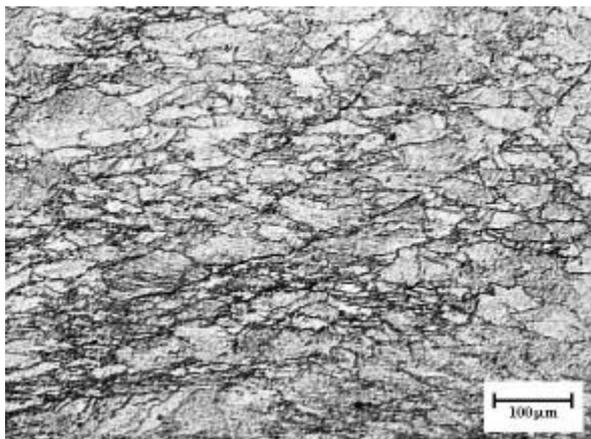


Figura 8 - Fotomicrografia mostrando grãos austeníticos da região (6).

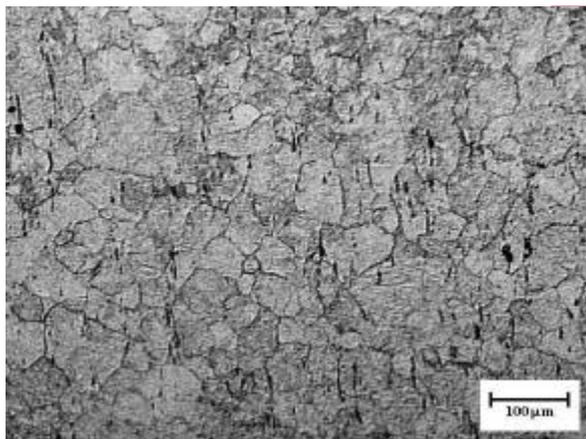


Figura 9 - Fotomicrografia mostrando grãos austeníticos da região (7).

CONCLUSÕES

Observa-se que há diferentes fenômenos metalúrgicos atuando no material do corpo de prova.

As fotomicrografias mostram a existência da recristalização dinâmica atuando em conjunto com a metadinâmica.

O mapa de deformação obtido no software Superforge é um indicador da deformação atuante no material para efeitos microestruturais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – e à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio dado ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GENTILE, F. C. E S. T. BUTTON - Estudo Do Processo De Cross-Wedge Rolling Para A Produção De Eixos Escalonados Com Aços Microligados; Trabalho apresentado no XXI Senafor, 23 e 24/10/2001, Gramado, RS.
- [2] REGONE, W. e JORGE JÚNIOR, A.M. e BALANCIN, O., Metodologia para Determinar os Tipos de Amaciamentos que Atuam em Processos Termomecânicos ; 14º CBECIMAT - São Pedro – SP - 3 a 6 de dezembro de 2000.
- [3] LE MAY, I; "Principles of Mechanical Metallurgy", Elsevier, New York, Cap.6, 1981.
- [4] MECKING, H. and GOTTSTEIN, G.; Recovery and Recrystallization During Deformation ; in: Recrystallization of Metallic Materials; ed. F. Haessner; Dr. Riederer; Verlag; p. 195-222; 1978.
- [5] PETKOVIC, R. A.; LUTON, M. J. and JONAS, J. J. ; Can. Met. Quart.; Vol. 14; p. 137; 1975.
- [6] McQUEEN, H. J. and JONAS, J. J.;_Recovery and Recrystallization During Hight temperature Deformation. in: Arsenaut, R. J.; Ed. Treatise on Materials Science and Technology; Vol. 6; p. 393-493; New York. Academic Press; 1976.
- [7] OLIVEIRA, M. A. F.; Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos; São Carlos – SP. 2001.
- [8] REGONE. W. e BALANCIN, O.; REM (Revista de Escola de Minas de Ouro Preto). Vol 51, pp.27-33; jan/mar. 1998.
- [9] OH, S.I.; WU, W.T. and ARIMOTO, K.: Recent Development in Process Simulation for Bulk Forming Processes. J. Mat. Proc. Technology, Vol 111, pp 2 –9, 2001
- [10] BRAMLEY, A.N. and MYNORS, D.J.: The use of simulations forging tools. Materials and Design, Vol. 21, pp.279 – 286, 2001.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSES OF THE MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF A HOT FORGED V-Ti MICROALLOYED STEEL

Hot metal forming processes are generally represented by sequences of heating and deformation, with a competition between softening and strain hardening, followed by the product cooling. Forged microalloyed steels show an extensive application in the automotive industry, because it is possible to eliminate the subsequent heat treatments usual for alloy steel forgings, with the appropriate metallurgical control. To analyze the microstructural evolution with the hot deformation, hot forging was simulated with laboratory tests held at similar forging conditions for a V-Ti microalloyed steel. Wedge upset tests were held to promote an important strain gradient along the whole workpiece. Microstructure analysis showed regions with static, dynamic and metadynamic recrystallization and regions still strain hardened. These microstructures were compared to strain maps simulated with the finite volume method using the software Superforge. Therefore it was possible to describe the microstructure evolution for that microalloyed steel that can be related to the strain map representing the deformed samples.

Key words: forging; microstructural evolution; numerical analysis.